

OPTIMIZACIÓN DE COSTES EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE MINERÍA DE DATOS. APLICACIÓN A FORJADOS UNIDIRECCIONALES.

Julio Fernández-Ceniceros

Eduardo Martínez-de-Pisón

Francisco Javier Martínez-de-Pisón

Rubén Lostado-Lorza

Luis Celorrio-Barragué

Grupo EDMANS

Universidad de La Rioja

Abstract

The area of structural optimization has had a great importance in the last decades. Researchers' efforts trying to reduce the weight of structures have provided numerous papers in this field. However, a minimum weight design is not necessarily the minimum cost design; only a small fraction of the papers of structural optimization deals with minimizing the final cost.

In this study, a cost optimization methodology of concrete structures is presented, that without forgetting the importance of reducing the energy use of the process. The mixture of different components and materials in those structures provides us with numerous design alternatives which diversify the final cost of it. In order to minimize the final cost and the energy use, an algorithm is programmed to get the best structure, and also data mining techniques are applied to take out useful knowledge in order to help the designer. The proposed methodology is applied in a case study of unidirectional slabs with lattice reinforcement joists.

Keywords: *Optimization; costs; concrete; data mining*

Resumen

El área de la optimización estructural ha experimentado una gran difusión en las últimas décadas. Los esfuerzos de los investigadores por reducir el peso de la estructura a lo estrictamente necesario, han proporcionado gran cantidad de publicaciones en este campo. Sin embargo, un diseño encaminado a minimizar el peso no siempre garantiza la optimización de los costes; en este sentido, sólo una pequeña fracción de las investigaciones realizadas se ha centrado en minimizar el presupuesto de la estructura.

En este artículo se presenta una metodología orientada a la optimización de costes en estructuras de hormigón, sin olvidar la importancia de reducir el consumo energético del proceso. La combinación de diferentes componentes y materiales en este tipo de construcciones proporciona múltiples opciones de diseño que varían el coste final de la misma. Con objeto de minimizar el precio final y el consumo energético, se programa un algoritmo para obtener tipologías óptimas y se aplican técnicas de minería de datos para extraer conocimiento útil que ayude al diseñador. Como caso práctico, se aplica al estudio de un forjado unidireccional con viguetas armadas.

Palabras clave: Optimización; costes; hormigón; minería de datos

1. Introducción

El cálculo estructural, por su propia naturaleza no lineal y altamente compleja, requiere un proceso iterativo con objeto de cumplir los Estados Límite Últimos (ELU) y Estados Límite de Servicio (ELS). Tal proceso conlleva la realización de múltiples comprobaciones, a resistencia, a rigidez y, en casos más concretos como los componentes estructurales de hormigón, la propia normativa establece unos condicionantes mínimos que garanticen la seguridad y durabilidad de la estructura. Como consecuencia, resulta una difícil tarea encontrar la solución más adecuada, haciéndose aún más complicado cuando se trata de averiguar aquélla de coste óptimo. Las múltiples variables que intervienen en esta función (materias primas, mano de obra, tiempos de ejecución, transporte) así como la fluctuación de los precios del mercado, hacen que cada solución óptima sea particular y restringida al marco espacio-temporal. Los autores Adeli y Sarma (2006) señalan las dificultades adicionales de la minimización de costes, afirmando que sólo una pequeña fracción de los artículos publicados en optimización estructural conducen a una reducción económica.

En este sentido, los primeros trabajos realizados en optimización de costes de estructuras de hormigón se centraban en elementos tales como vigas y, en menor medida, forjados. Goble y Lapay (1971) minimizan el coste de vigas de hormigón pretensado de sección en T basadas en el código ACI, utilizando el método de proyección del gradiente. La función de coste incluía el consumo de hormigón, el acero de refuerzo y pretensado, así como el encofrado.

Friel (1974) encuentra la relación óptima entre acero y hormigón para conseguir el mínimo coste en vigas de hormigón pretensado simplemente apoyadas, utilizando las restricciones de momento último del código ACI. La función de coste despreja el acero pretensado y añade un término adicional para aumentar el gasto económico debido al incremento en la altura del edificio. El autor concluye que los costes de encofrado y la variación en altura no influyen de forma significativa en la cuantía total.

Brown (1975) presenta un método iterativo para la selección del espesor de mínimo coste de un forjado unidireccional simplemente apoyado, utilizando únicamente las restricciones a flexión del código ACI. El autor proporciona ahorros superiores al 17%.

Las anteriores son sólo algunas de las primeras investigaciones sobre optimización de coste en estructuras de hormigón. Los avances en el área computacional y el descubrimiento de nuevos algoritmos de búsqueda de soluciones óptimas han proporcionado potentes herramientas, permitiendo aumentar el número y rango de variables a considerar en el proceso y obteniendo un resultado de coste óptimo total más amplio. Prueba de ello puede verse en trabajos como el de Castilho, El Debs y Nicoletti (2006), en el que utilizan técnicas evolutivas como los algoritmos genéticos para obtener el diseño más económico en forjados unidireccionales con viguetas pretensadas. La función de coste a optimizar amplía sus límites, incluyendo materias primas, costes de fabricación, transporte hasta la obra y ejecución. Otro ejemplo a mencionar es la investigación llevada a cabo por Payá et al. (2006), en el que utilizan técnicas heurísticas como la búsqueda aleatoria o el gradiente y metaheurísticas como la aceptación por umbrales o la cristalización simulada, para el cálculo óptimo de pórticos de edificación con coste mínimo. En este caso, se optimizan las dimensiones de vigas y pilares, el armado de los mismos así como los tipos de aceros y hormigones. La función de coste incluye el coste de los materiales y el de todas las partidas necesarias para ejecutar los pórticos.

Por otro lado, en los últimos años está cobrando cada vez más importancia la preocupación por realizar construcciones sostenibles; no sólo deben ser capaces de resistir los esfuerzos

a que estén sometidas utilizando la combinación óptima de materiales que minimice el coste si no que, además, debe existir un compromiso con el medio ambiente a fin de reducir, entre otras cosas, las emisiones de CO₂ o el coste energético asociado a los materiales y procesos de fabricación y ejecución de la estructura. En Payá et al. (2009), se presenta una optimización de emisiones de CO₂ en la construcción de pórticos de edificación mediante cristalización simulada; los resultados se comparan con diseños encaminados a minimizar el coste y se observa que ambos objetivos están relacionados. Las soluciones más comprometidas con el medio ambiente suponen un pequeño sobrecoste, aceptable en la práctica. Este hecho resalta la importancia de buscar las mejores opciones a la hora de realizar un diseño, proporcionando no sólo reducciones económicas sino también resultados sostenibles.

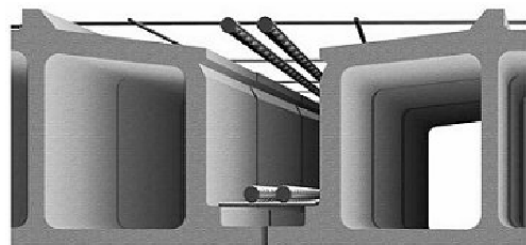
El interés de este artículo reside en valorar las soluciones óptimas de forjados unidireccionales con vigueta armada u hormigonados *in situ*, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental. A partir de aquí, se generará una base de datos con las variables de entrada más significativas y la solución más adecuada para cada combinación de las mismas. Por último, se recurrirá a técnicas de minería de datos para intentar extraer conocimiento oculto de la base de datos, obteniendo ciertas directrices a la hora de seleccionar una tipología de forjado óptimo, desde un punto de vista económico, medioambiental o una solución de compromiso entre ambos.

2. Planteamiento del problema y objetivos

En edificios de viviendas, la repercusión de los forjados completos representa un 15% aproximadamente del coste total. En edificios de oficinas y escuelas, las luces que suelen utilizarse pueden incrementar la repercusión del forjado hasta un 20% del coste total. Se trata de una de las partidas principales, solamente superada por las fachadas y la cubierta en edificios de una sola planta (Llorens, 1982).

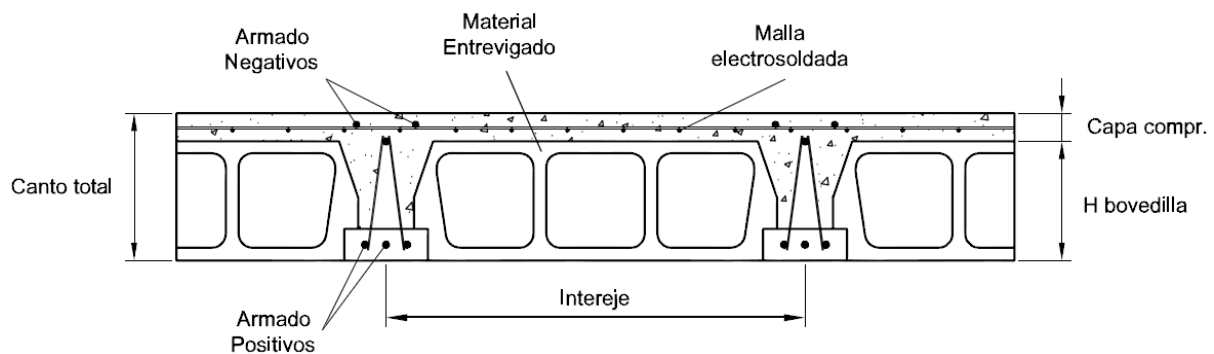
En España, el 70% de los edificios de viviendas están constituidos por forjados unidireccionales y pórticos planos de hormigón armado (Payá et al., 2006). Por tanto, este componente estructural puede considerarse una parte muy representativa dentro del coste global, siendo la tipología unidireccional una de las más utilizadas en nuestra zona geográfica. Este tipo de forjado se presenta en dos formas principalmente: forjado unidireccional con elementos prefabricados y forjado unidireccional *in situ* (Figura 1).

Figura 1: Forjado de vigueta armada (izda.) y forjado *in situ* (dcha.)



Ambos están formados por elementos resistentes (armadura de acero), material de entrevigado que realiza funciones de relleno y una capa de hormigón de compresión, tal como se muestra en la figura 2.

Figura 2: Sección transversal del forjado



La diferencia entre ellos radica en la composición del elemento resistente; en el primer caso, la armadura de acero va incluida en viguetas prefabricadas de hormigón, que pueden ser armadas o pretensadas; en el forjado *in situ*, se trasladan las barras de acero hasta la obra, se colocan sobre unos soportes y se hormigona todo el conjunto. No existen ventajas claras sobre la utilización de una u otra técnica, mientras que el *in situ* ahorra los costes de fabricación y transporte de las viguetas, aumentan los tiempos de encofrado y colocación, encareciendo los costes de ejecución.

El principal problema al que se enfrenta el diseñador a la hora de dimensionar este tipo de forjados es la gran cantidad de variables que intervienen en el cálculo, siendo necesario un proceso iterativo si se desea encontrar la solución óptima respecto a una función objetivo. Entre las variables a elegir por el diseñador se encuentra: la forma de ejecución (elementos prefabricados o *in situ*), el material del elemento entrevigado o el canto total del forjado.

De esta forma, los objetivos del presente trabajo se centran en:

- Crear una herramienta que sea capaz de valorar diferentes tipologías de forjado para unas especificaciones de entrada dadas y ordenar los resultados por coste económico, repercusión medioambiental o una solución de compromiso que englobe ambos términos.
- A partir de la herramienta de optimización, generar una base de datos representativa que abarque las dimensiones y estados de carga más significativos en la práctica estructural de forjados unidireccionales, obteniendo la tipología óptima para cada situación.
- Aplicar técnicas de minería de datos para extraer conocimiento oculto de la base de datos que explique el comportamiento relativo a las variables de entrada más influyentes.

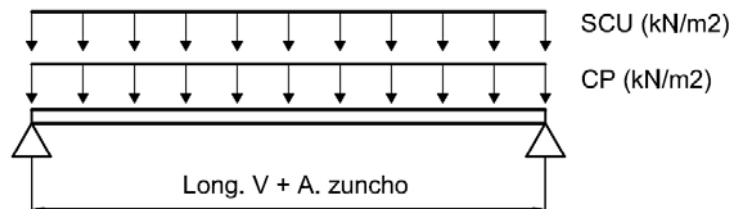
3. Caso de estudio

Una vez descritos los objetivos perseguidos, se presenta el caso de estudio aplicado a forjados unidireccionales simplemente apoyados, de un solo vano. Las variables que intervienen en el diseño se clasifican en:

- Variables definidas por el diseñador:
 - Longitud de vigueta (m).
 - Ancho de zuncho (m).

- Cargas permanentes (pavimento y tabiquería, en kN/m^2).
- Sobrecarga de uso (kN/m^2).

Figura 3: Variables definidas por el diseñador



- Variables propias de la tipología de forjado:
 - Sistema de forjado (vigüeta armada o *in situ*).
 - Distancia de intereje (cm).
 - Altura de bovedilla o material de entrevigado (cm).
 - Material de bovedilla (hormigón, hormigón aligerado o poliestireno expandido).
 - Altura capa de compresión de hormigón (cm).

El tipo de acero y hormigón utilizados son fijos:

- Hormigón: HA-25/B/12/I.
- Acero para armaduras de positivos y negativos: B 500 S.
- Acero para armaduras de reparto (malla electrosoldada): B 500 T.

Definidas las variables de entrada, se crea un algoritmo que dimensiona el armado, determina los consumos de todos los materiales y calcula las funciones de coste económico y consumo energético para cada tipología de forjado.

3.1 Algoritmo de cálculo de forjados

La programación del algoritmo se realiza con el software libre R, adecuado para manejar gran cantidad de datos por su rapidez de cálculo. El programa se divide en varias fases. Para cada una de las tipologías estudiadas, se realiza un cálculo resistente en el que se selecciona el armado mínimo requerido para cumplir los ELU de agotamiento frente a sollicitaciones normales y frente a cortante, y los ELS de fisuración y deformación, según especificaciones de EFHE y EHE-08. Se calculan los consumos de hormigón, acero de armaduras de positivos, negativos, celosía de cortante y armadura de reparto, así como el material de entrevigado necesario por cada metro cuadrado de forjado.

Por último, se aplican las funciones de coste económico y consumo energético. La función de coste está compuesta por materias primas, elaboración, transporte desde el punto de suministro a la obra y ejecución en la misma. Los precios están actualizados a enero del

2010, según datos del banco BEDEC del ITeC (Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña).

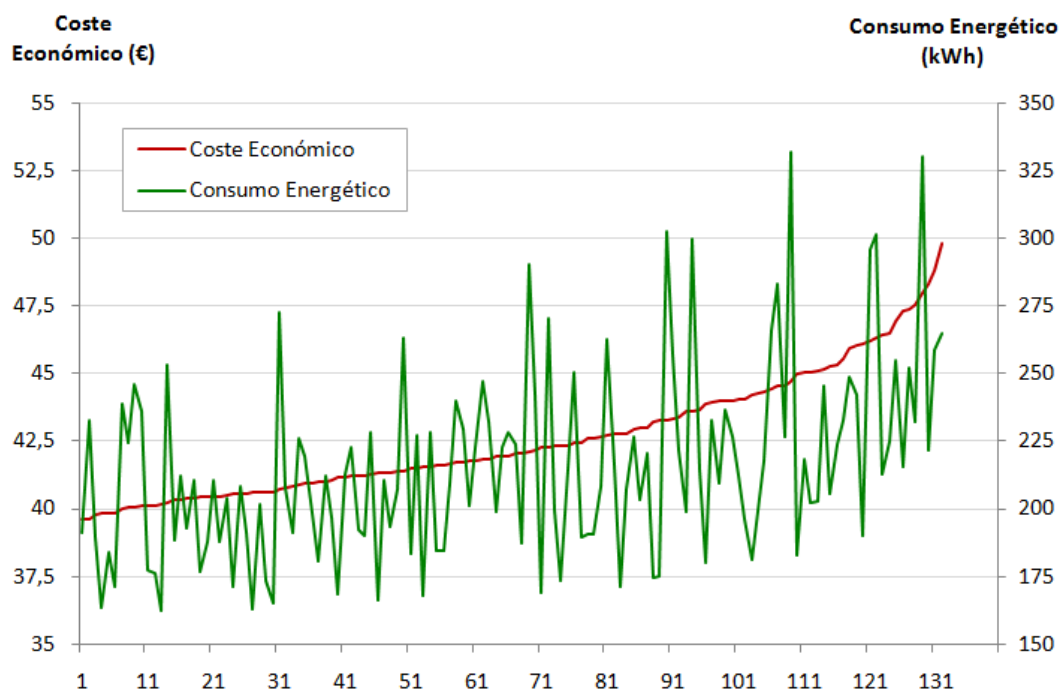
El cálculo del consumo energético considera la extracción de la materia prima, el transporte del origen a la fábrica y el proceso de fabricación y, en la maquinaria, el tiempo de funcionamiento para la ejecución del elemento, potencia de la máquina y tipo de motor y combustible. Dichos datos han sido obtenidos igualmente del banco BEDEC.

A modo de ejemplo, se analizan los resultados obtenidos para las siguientes variables de entrada:

- Longitud de vigueta (LVig) = 5,00 m.
- Ancho de zuncho (Ancho_Z) = 0,4 m.
- Cargas permanentes (CP) = 1,5 kN/m².
- Sobrecarga de uso (SCU) = 2,0 kN/m².

Se encuentran 133 tipologías válidas desde el punto de vista resistente, ordenándose de menor a mayor coste económico. Para cada propuesta, se muestra el consumo energético asociado por cada metro cuadrado de forjado realizado (Figura 4).

Figura 4: Relación Coste Económico vs. Consumo Energético, para todas las tipologías válidas



Existe una tendencia al aumento del consumo energético a medida que se incrementa el coste por metro cuadrado. La utilización de soluciones con cantos más altos implica una mayor cantidad de material, hecho que repercute en el precio final del forjado y en un incremento del consumo energético. Sin embargo, a pesar de la tendencia, la curva de consumo energético presenta grandes saltos y diferencias acusadas entre soluciones próximas en coste. Una de las causas es el material de las bovedillas; el poliestireno expandido penaliza en gran medida el consumo de energía en su fabricación en relación a

otras alternativas que utilizan hormigones prefabricados. Por otro lado, la utilización de cantos más pequeños ayuda a disminuir el precio final del forjado, pero obliga a incrementar la cuantía de los armados, propiciando soluciones menos favorables desde el punto de vista energético.

En este caso, la tipología más comprometida con el medio ambiente supone una reducción en el consumo energético del 14,4% y un incremento en el coste únicamente del 1,41% respecto a la solución más económica. A partir de aquí, se establece un criterio consistente en valorar de manera equitativa la importancia del coste económico y el consumo energético. Se normalizan ambas variables y se clasifican los resultados según un índice promedio de las dos. De esta forma, se obtiene una solución de compromiso entre el aspecto “económico” y el “ecológico”.

3.2 Aplicación de técnicas de Minería de Datos

La minería de datos comprende un conjunto de herramientas útiles para la búsqueda de conocimiento oculto en bases de datos. Entre las diferentes técnicas existentes cabe mencionar (Hernández et al., 2004):

- Modelización estadística paramétrica y no paramétrica.
- Redes neuronales.
- Árboles de decisión y sistemas de reglas.
- Máquinas de vectores soporte.
- Métodos bayesianos.
- Reglas de asociación.
- Algoritmos evolutivos y reglas difusas.
- Métodos basados en casos y vecindad.

En este caso, las técnicas más indicadas serán las que proporcionen reglas sobre las opciones de diseño más adecuadas a partir de las variables de entrada.

Árboles de decisión y algoritmos generadores de reglas

Los árboles de decisión y los algoritmos generadores de reglas son unos de los algoritmos clasificadores más conocidos y usados en las tareas de minería e datos. Generan modelos formados por conjuntos de condiciones que se plasman en forma de árboles o reglas de fácil comprensión.

Los árboles de decisión realizan una búsqueda dentro del espacio de instancias de la variable que mejor particionan dicho espacio en clases disjuntas. Este proceso, denominado “búsqueda por partición”, se realiza en fases sucesivas hasta que las clases son separadas adecuadamente.

Otros algoritmos, en cambio, realizan una búsqueda de la regla que mayores ejemplos cubre. Una vez encontrada, se eliminan los ejemplos cubiertos y se siguen buscando nuevas reglas que cubran los ejemplos todavía no explicados. Este proceso se denomina “búsqueda por cobertura” y es muy común en los algoritmos generadores de reglas.

Las principales ventajas de los árboles de decisión es que son fáciles de utilizar, robustos y pueden trabajar con un elevado número de variables de entrada. La desventaja fundamental es que el grado de precisión de los mismos no es tan elevado como otros algoritmos y que, si los grupos de casos son muy dispersos, pueden generarse árboles muy grandes y difíciles de interpretar.

Base de datos de forjados óptimos

Para la aplicación de cualquier proceso de minería de datos es necesario obtener una base de datos representativa del espacio de instancias posibles y, a partir de ésta, generar los diferentes modelos.

Partiendo del algoritmo de cálculo de forjados óptimos se genera, mediante programación en R, una base de datos de 7500 registros en la que se obtiene, para cada combinación de variables de entrada, una salida que indica la tipología de forjado que minimiza el coste y el consumo energético. En la Tabla 1 se muestran las variables de la base de datos y los rangos utilizados.

Tabla 1. Descripción de variables de entrada y salida

VARIABLES	
Nombre	Descripción
LongV	Longitud de vigueta (entre 2.00 y 8.00 m).
Ancho_Z	Anchura del zuncho (entre 0.1 y 0.9 m).
CP	Cargas permanentes, tabiquería + pavimento (entre 1.0 y 4.0 kN/m ²).
SCU	Sobrecarga de uso (entre 1.0 y 8.0 kN/m ²).
Tipo_Armado	Tipo de ejecución del armado: viguetas armadas o colocación <i>in situ</i> (Valores: V o I).
Mat_Bov	Tipo de material de bovedilla: Hormigón, Hormigón Aligerado, Poliestireno expandido (Valores: H, A o P).
H_Bov	Altura de Bovedilla, en cm (Valores: 17-22 o 25-30).

Esta base de datos abarca la casuística más común de forjados unidireccionales en lo que se refiere a luces de vano y estados de carga.

Creación de árboles de decisión y búsqueda de conocimiento útil

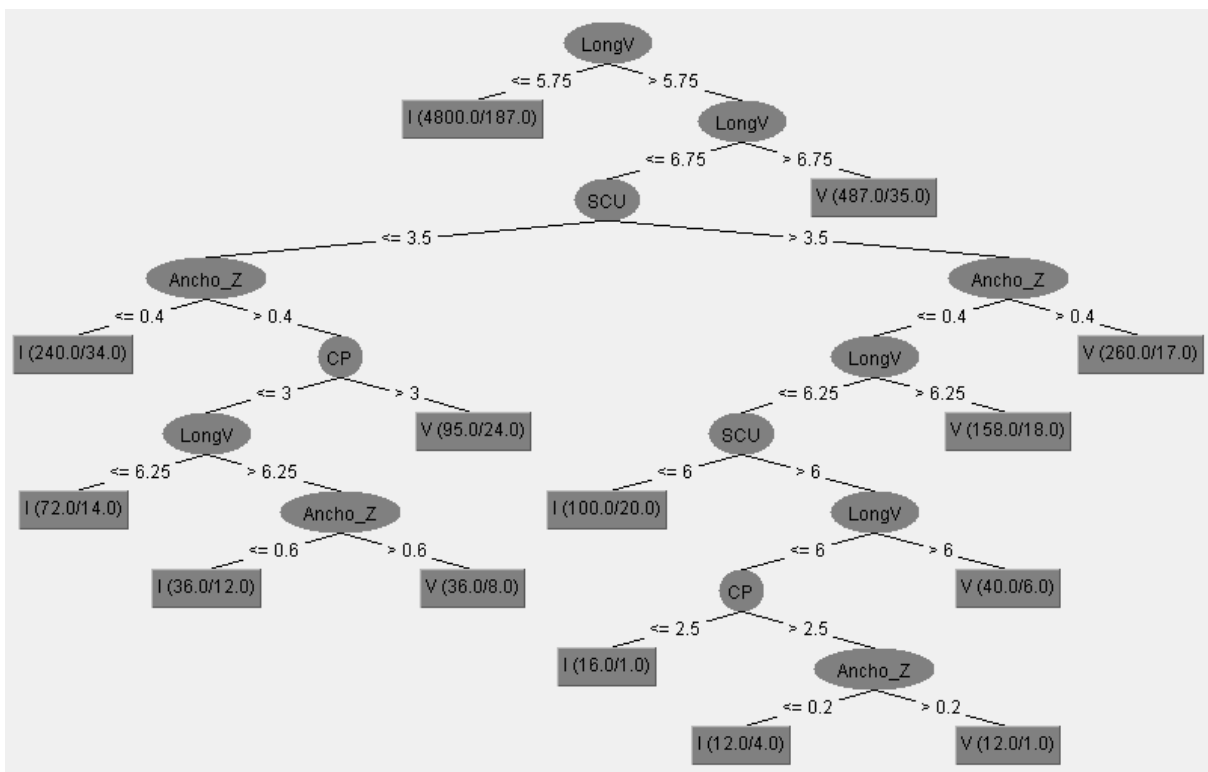
En las figuras 5, 6 y 7 se muestran los árboles para la selección del tipo de armado, el material de las bovedillas y la altura de las mismas, respectivamente. Estos árboles de decisión se han realizado con el software libre Weka 3.7.0, utilizándose una variante actualizada en Java del algoritmo C4.5, denominado J48. Se han ajustado los parámetros relacionados con el podado, con objeto de obtener árboles que no sean excesivamente grandes pero capaces de explicar con cierta precisión las clases que se le presentan.

La forma de interpretar el esquema del árbol es muy intuitiva. Se desciende desde la raíz en función de los valores de diseño de las variables de entrada, hasta terminar en una hoja que

indica la clase (salida), mostrando entre paréntesis los casos que han “caído” en esa hoja partido de los que se han clasificado de forma incorrecta.

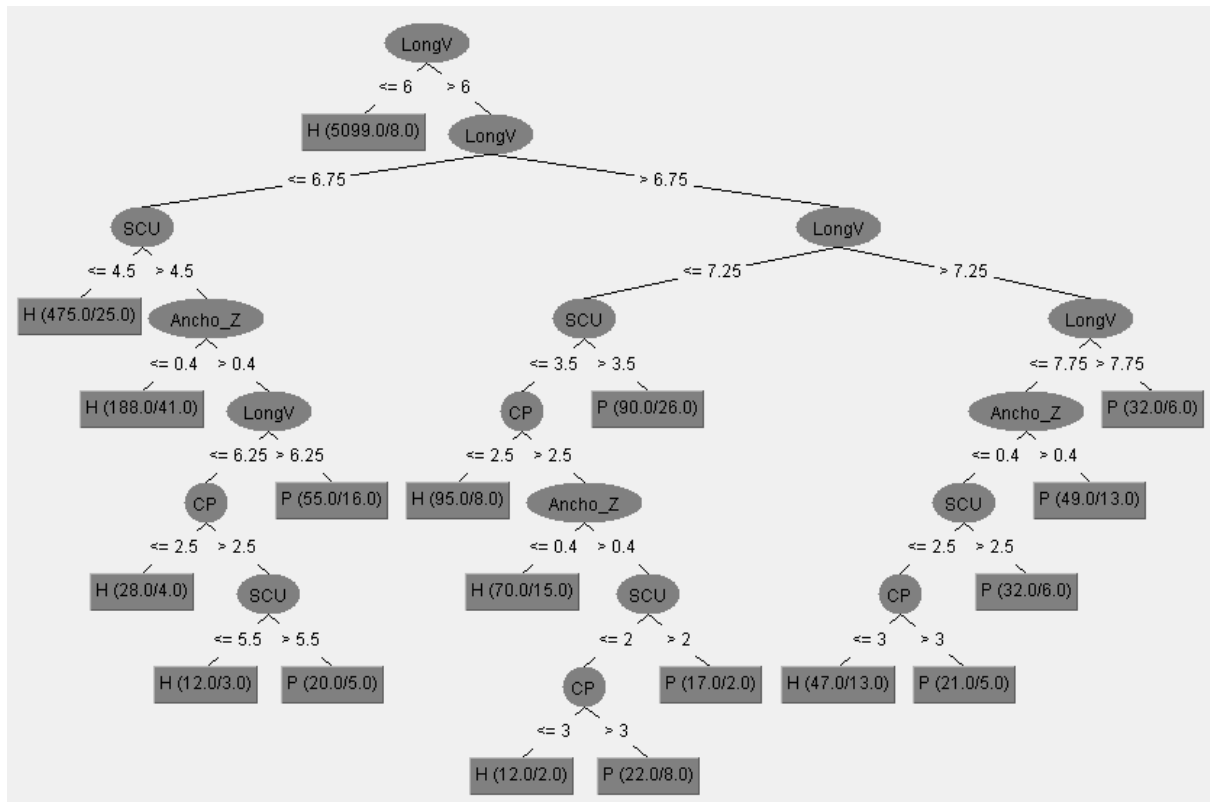
Uno de los aspectos más interesantes de este tipo de clasificadores es la posibilidad de encontrar conocimiento útil acerca de las variables más influyentes y los valores de éstas. Del primero de los árboles (Figura 5) se puede determinar que la variable más importante es la longitud de la vigueta: Si la longitud es inferior a 5,75 m, lo más adecuado es realizar un forjado *in situ*; para longitudes superiores a 6,75 m el diseño óptimo recomienda utilizar vigueta armada. En los casos intermedios entran en juego el resto de variables, siendo necesario descender por las distintas ramas del árbol.

Figura 5: Árbol de decisión para selección del tipo de armado



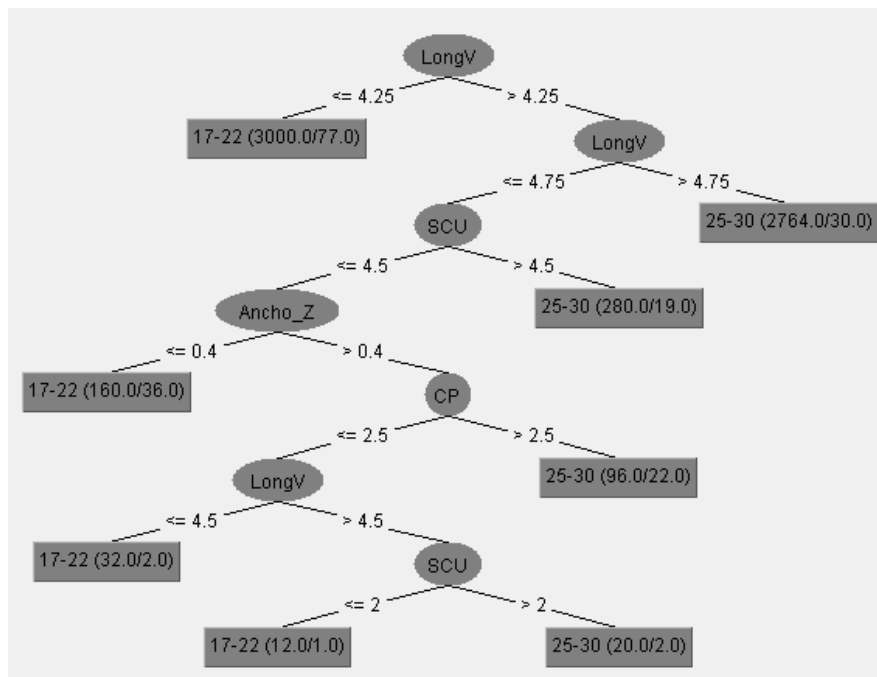
De forma similar al caso anterior, se observa que la longitud de vigueta es determinante a la hora de seleccionar el material de la bovedilla (Figura 6). Para longitudes inferiores a 6 m, el hormigón prefabricado proporciona la solución óptima entre coste y consumo energético. Longitudes superiores a 7,75 m se decantan por el poliestireno expandido. Para longitudes intermedias es necesario descender por el resto de variables. El elevado consumo energético en el proceso de fabricación del poliestireno relega este material a longitudes de vigueta elevadas o condiciones de carga exigentes.

Figura 6: Árbol de decisión para selección del material de bovedilla



Por último, el árbol de la figura 7 se presenta como herramienta para escoger entre bovedillas de cantos pequeños (entre 17 y 22 cm) o bovedillas de cantos grandes (entre 25 y 30 cm). Nuevamente la longitud de vigueta vuelve a ser determinante: Para longitudes inferiores a 4,25 m se utilizan bovedillas de canto pequeño mientras que para longitudes superiores a 4,75 m, lo más adecuado desde el punto de vista de la optimización es la colocación de bovedillas de canto grande.

Figura 7: Árbol de decisión para selección de la altura de bovedilla



La creación de árboles de decisión ha servido, entre otras cosas, para descubrir que la longitud de viga es la variable más influyente a la hora de diseñar el forjado óptimo. Llegados a este punto, es posible conjugar los tres árboles anteriores y establecer reglas de decisión tomando en cuenta únicamente esta variable:

1. Si $(\text{LongV} \leq 4,25 \text{ m})$ entonces (Insitu/Hormigón/17-22).
2. Si $(4,75 \text{ m} < \text{LongV} \leq 5,75 \text{ m})$ entonces (Insitu/Hormigón/25-30).
3. Si $(6,75 \text{ m} < \text{LongV} \leq 7,75 \text{ m})$ entonces (Vigueta/25-30).
4. Si $(\text{LongV} > 7,75 \text{ m})$ entonces (Vigueta/Poliestireno/25-30).

4. Conclusiones

Se ha presentado en este artículo una metodología para la optimización de forjados unidireccionales. En ocasiones, la tipología viene impuesta por condicionantes externos; en otros casos, el diseñador se enfrenta a un gran abanico de soluciones posibles en el que resulta complejo buscar la mejor opción. Sin embargo, dada la situación actual del mercado donde la competitividad en precios y la preocupación medioambiental toman cada vez mayor importancia, encontrar el tipo de forjado óptimo puede repercutir de manera muy positiva en el resultado final de la estructura.

El cálculo estructural se ha realizado mediante programación en R. A partir de las tipologías válidas se ha hecho un estudio de coste económico y consumo energético, destacando la correlación entre ambos parámetros. En general, los diseños más económicos proporcionan soluciones constructivas más comprometidas con el medio ambiente. Sin embargo, la utilización de materiales derivados del petróleo como el poliestireno expandido penaliza en gran medida este parámetro.

Técnicas de minería de datos han sido utilizadas para la búsqueda de conocimiento útil a partir de una base de datos de forjados óptimos. Estas herramientas han permitido crear

árboles de decisión, que indican las variables más influyentes en la optimización del diseño y de qué forma afectan éstas en las salidas. Por último, es importante destacar que estas reglas de diseño son válidas cuando el objetivo es reducir costes y minimizar el consumo energético en la construcción. Existen otros parámetros a tener en cuenta desde el punto de vista de una optimización multiobjetivo más amplia (facilidad de construcción, disponibilidad de recursos, eficiencia energética proporcionada), que pueden arrojar resultados sensiblemente distintos.

5. Referencias

- Adeli, H., & Sarma, K. C. (2006). *Cost optimization of structures*. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.
- Brown, R. H. (1975). Minimum cost selection of one-way slab thickness. *Journal of the Structural Division*, 101, 2585-2590.
- Castilho, V. C., El Debs, M. K. & Nicoletti, M. C. (2006). Using a modified genetic algorithm to minimize the production costs for slabs of precast prestressed concrete joists. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20, 519-530.
- De Llorens, J. (1982). Manual de Forjados. *CAU, Construcción Arquitectura y Urbanismo*, nº 77 a 81.
- El Debs, M.K. (2000). *Precasted concrete: basics and applications*. SãoCarlos, Projeto REENGE, EESC-USP.
- Friel, L. L. (1974). Optimum singly reinforced concrete sections. *ACI Journal*, 71(11), 556-558.
- Goble, G. G., & Lapay, W. S. (1971). Optimum design of prestressed beams. *ACI Journal*, 68(9), 712-718.
- Hernández, J., Ramírez, M. J., & Ferri, C. (2004). *Introducción a la Minería de Datos*. Madrid, España: Prentice Hall.
- Kirsch, U. (1972). Optimum design of prestressed beams. *Computers and Structures*, 2(4), 573-583.
- Kirsch, U. (1973). Optimum design of prestressed plates. *Journal of the Structural Division*, 99, 1075-1090.
- Payá, I., Yepes, V., Clemente J. J. & González, F. (2006). Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado. *Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 22(3), 241-259.
- Payá, I., Yepes, V., Hospitaler, A. & González, F. (2009). CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures*, 31, 1501-1508.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Dr. Francisco Javier Martínez de Pisón Ascacíbar
Grupo EDMANS. URL: <http://www.mineriadatos.com>
Área de Proyectos de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica
Edificio Departamental. ETSII de Logroño. C/ Luís de Ulloa, 20, 26004 Logroño (España).
Phone: +34 941 299 232
Fax: + 34 941 299 794
E-mail: fjmartin@unrriroja.es